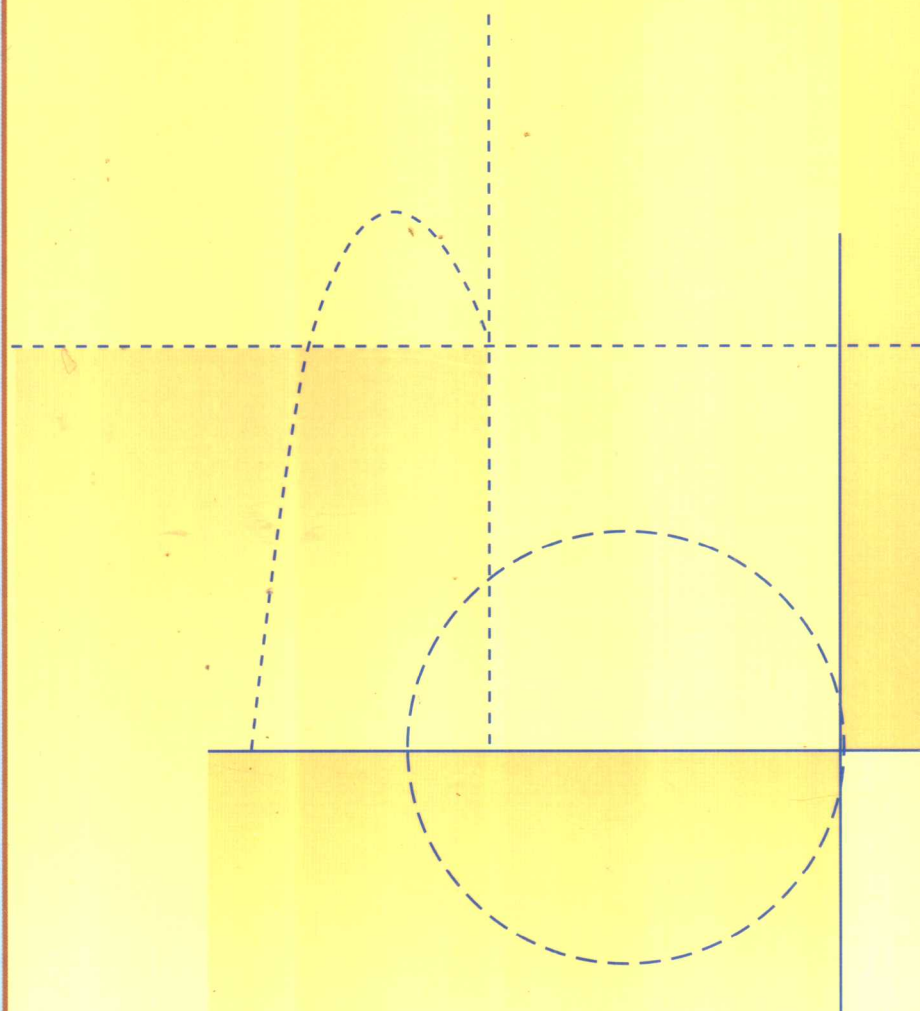


过程控制原理

王爱广 主编



化学工业出版社

过程控制原理

王爱广 主编

化学工业出版社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

过程控制原理/王爱广主编. —北京: 化学工业出版社, 1999. 5
ISBN 7-5025-2333-2

I. 过… II. 王… III. 过程控制-专业学校-教材
IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 06534 号

过程控制原理

王爱广 主编

责任编辑: 唐旭华

责任校对: 陈 静

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

新华书店北京发行所经销

北京市燕山印刷厂印刷

北京市燕山印刷厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 12¼ 字数 303 千字

1999 年 5 月第 1 版 2002 年 7 月北京第 2 次印刷

ISBN 7-5025-2333-2/G · 637

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是根据 1996 年制定的《过程控制原理》教学大纲而编写的。在新的专业教学计划中，考虑到控制原理为其他专业课程奠定基础，特将原来的《化工自动化基础》一书分为《过程控制原理》和《过程控制工程》两本书。

全书分为六章。第一章阐述过程控制系统的概念及其组成以及对系统的要求；第二章是过程控制系统数学模型及其建立，为系统的定量分析做好准备；第三章至第五章是经典控制理论的三种分析方法；第六章是为适应计算机控制系统的需要，对有关离散控制系统的分析不仅介绍了经典控制理论的 z 变换法，同时对现代控制理论的状态空间分析法作了相应的叙述，以期读者能对现代控制理论奠定一些基础。

为了帮助读者学习和掌握过程控制系统的基本概念、基本理论和基本分析方法，本书在每章后均附有小结、例题和解答，并选编了适量的思考题与习题。本书的特点是在理论上立足中专基点，内容方面力求精简、深入浅出；同时考虑了全书与《过程控制工程》一书的衔接。

本书由王爱广主编（第一章至第四章），王晓霞参编（第五章、第六章），陈宝文任本书主审。吕泰苍、孙鸿、张国华、方清化等老师参加了审稿工作，对本书提出了许多宝贵意见。在编写本书过程中参考并选取了叶昭驹主编的《化工自动化基础》及侯奎源主编的《化工自动化基础》教材中的部分内容，在此一并表示衷心的感谢。

限于编者水平，书中定有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1998 年 6 月

目 录

绪论	1
一、自动控制与过程控制	1
二、自动控制理论的发展	1
三、过程控制原理的基本内容	1
四、本课程与其他课程的关系	2
第一章 过程控制系统的基本概念	3
第一节 过程控制系统的组成及其分类	3
一、过程控制系统的组成	3
二、过程控制系统的方块图及其术语	4
三、过程控制系统的分类	5
第二节 过程控制系统的过渡过程和质量指标	6
一、过程控制系统的过渡过程	6
二、典型输入信号	6
三、对过程控制系统的基本要求	7
四、过程控制系统的质量指标	8
本章小结	10
例题和解答	10
思考题与习题	11
第二章 过程控制系统的传递函数	12
第一节 建立被控对象或环节的数学模型	12
一、数学模型	12
二、一阶环节的数学模型	12
三、二阶环节的数学模型	18
第二节 传递函数	20
一、传递函数	20
二、典型环节及其传递函数	22
三、环节基本组合方式及其传递函数	26
第三节 过程控制系统的方块图简化	28
一、方块图等效变换的规则	29
二、方块图等效变换的应用	31
*三、梅逊 (Mason) 公式及其应用	33
第四节 过程控制系统的传递函数	36
一、系统开环传递函数	36
二、定值系统的传递函数	37

注：带“*”的内容供选修。

三、定值系统的偏差传递函数	37
四、随动系统的传递函数	37
五、随动系统的偏差传递函数	37
第五节 被控对象数学模型的实验测取	38
一、对象的自衡特性	38
二、阶跃法的数据处理	39
本章小结	42
例题和解答	43
思考题与习题	50
第三章 过程控制系统的微分方程分析法	53
第一节 过程控制系统微分方程分析法	53
一、过程控制系统微分方程式的建立	53
二、过程控制系统微分方程式的求解	56
三、过程控制系统过渡过程曲线的绘制	57
四、过程控制系统过渡过程的质量指标评定	59
第二节 线性二阶过程控制系统的讨论	60
一、线性二阶系统标准数学模型	60
二、线性二阶系统的过渡过程	61
三、线性二阶系统标准过渡过程曲线	62
四、线性二阶系统质量指标与衰减系数的关系	64
第三节 劳斯 (Routh) 稳定判据	68
一、过程控制系统稳定的基本条件	68
二、劳斯 (Routh) 稳定判据	70
三、稳定裕度及其检验	73
四、分析系统参数对稳定性的影响	74
第四节 常规控制规律对过程控制质量的影响	75
一、常规控制器的控制规律	75
二、常规控制器的控制规律对过程控制质量的影响	79
本章小结	83
例题和解答	85
思考题与习题	91
第四章 过程控制系统的根轨迹分析法	94
第一节 根轨迹的基本概念	94
一、根轨迹法的思路	94
二、根轨迹的定义	94
第二节 特征根与过渡过程的关系	95
一、特征根在根平面上的分布与过渡过程的关系	96
二、质量指标在根平面上的表示	98
第三节 绘制根轨迹的方法	101
一、绘制根轨迹的依据	101

二、绘制根轨迹的规则	103
第四节 过程控制系统根轨迹的讨论	110
一、确定开环放大系数 K 的稳定范围	110
二、积分时间对根轨迹的影响	114
三、微分时间对根轨迹的影响	115
本章小结	118
例题和解答	119
思考题与习题	125
第五章 过程控制系统的频率特性分析法	128
第一节 频率特性函数及其图解表示法	128
一、频率特性概念	128
二、频率特性与传递函数的关系	129
三、频率特性的图解表示法 (Bode 图和 Nyquist 图)	130
第二节 奈魁斯特 (Nyquist) 稳定判据	140
一、围线映射定理	140
二、奈魁斯特 (Nyquist) 稳定判据	141
三、奈魁斯特稳定判据应用举例	142
第三节 稳定裕度与稳定裕度法	144
一、稳定裕度	144
二、过程控制系统分析和设计的稳定裕度法	145
本章小结	150
例题和解答	150
思考题与习题	153
第六章 离散控制系统分析法与状态空间分析法	156
第一节 离散控制系统分析	156
一、A/D 转换和 D/A 转换的数学描述	156
二、离散系统的数学描述	157
三、离散系统的稳定性分析	162
第二节 过程控制系统的状态空间描述	165
一、状态空间的基本概念	165
二、状态空间表达式的建立	166
三、线性定常系统状态方程的解法	172
四、离散系统的状态空间描述	174
本章小结	178
例题和解答	179
思考题与习题	181
附录 1 拉氏变换对照表	183
附录 2 $\mathcal{Z}$ 变换及其性质	185
附录 3 $\mathcal{Z}$ 变换表	187
参考文献	188

绪 论

一、自动控制与过程控制

所谓自动控制就是在没有人直接参与的情况下,通过控制器使被控制的对象或过程自动地按照预定的规律运行。例如导弹能够命中目标;人造卫星能按预定的轨道运行或返回地面;宇宙飞船能够在月球和其他星球着陆探测后返回地球等等,都是应用自动控制技术的结果。

在工业生产过程中,需要对温度、湿度、压力、流量、频率、液位、浓度等变量控制,这也都属自动控制技术的范畴。为了区分自动控制范畴内的其他类型控制,把工业生产过程中温度、压力、流量、液位、成分等状态变量作为被控变量的控制叫作过程控制。

自动控制装置控制器和被控制对象两者组合为一起,共同完成一定任务,称作自动控制系统。这里所指的被控对象,可以是一个机器设备,或者是一个生产过程以及其他物体。

过程控制所采用的是工业控制器,一般又称作控制器(过程控制专用控制器);由控制器和被控对象的总和而构成的系统称为过程控制系统。

自动控制系统或过程控制系统都是为了一定目的:保证系统输出具有预定的性能;保证系统输出尽量不受扰动的影响。

二、自动控制理论的发展

自动控制理论目前分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。远在经典控制理论形成之前,就有蒸汽机的飞轮调速器、鱼雷的航向控制系统、航海罗经的稳定器、放大电路的镇定器等自动控制装置的出现。这些只是不自觉应用了反馈控制概念而构成的自动控制器件和系统的成功例子。直到20世纪20~40年代,经典控制理论的形成,特别是在二次世界大战中的许多武器和通信自动化系统的研制与应用,自动控制理论和技术才发展很快,并且推广到其他工程技术领域。经典控制理论是以传递函数为基础,研究单输入—单输出自动控制系统的分析和设计。这一理论现已臻成熟,工程中广泛应用。

现代控制理论是60年代在经典控制理论的基础上,随着科学技术发展和工程领域的需要以及计算机的普遍应用而迅速发展起来的。经典控制理论中以图表、特制曲线(奈魁斯特曲线、伯德图、尼柯尔斯图、根轨迹等)和特制计算尺为主要计算、分析和设计工具;而现代控制理论中用各种语言设计计算程序为主要设计手段。所以说,现代控制理论无论在理论基础、数学工具、还是在研究方法上都不是经典理论的简单延伸和推广,而是认识上的飞跃。

现代控制理论是以状态空间法为基础,研究多输入—多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等自动控制系统的分析和设计。有线性系统理论、最优控制理论、自适应控制、动态系统辨识、大系统理论等分支学科。随着计算机技术和现代应用数学的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制以及集散控制等方面有了重大发展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的进步而日新月异地向前发展。

三、过程控制原理的基本内容

本书作为普通中等专业学校工业仪表及自动化专业学生的一门必修课教材,仍以经典控制理论为主要内容,现代控制理论为辅助内容。因此,概括本书内容可分为过程控制系统的

基本构成与基本要求；过程控制系统理论分析的基础；过程控制系统的分析方法三大部分。

过程控制系统的基本构成与基本要求，这是初学的学生首先要掌握的概念问题。比如：过程控制系统的组成与分类、过程控制系统的方块图、过程控制系统的过渡过程和质量指标，这些将在本书的第一章中作最基本的阐明。

过程控制系统理论分析的基础涉及拉普拉斯变换，考虑到学生在工程数学中已掌握了这方面知识，因此拉氏变换在本书正文中不再介绍，在附录中提供拉氏变换表供学生查阅。传递函数是经典控制理论的基础，将在第二章中用大量篇幅对围绕如何建立被控对象和控制系统的数学模型（从微分方程式到传递函数）、传递函数的定义与求取和复杂系统的传递函数作一介绍。考虑内容的紧凑，把状态变量放在后面的状态空间分析法中一并介绍。

过程控制系统的分析方法本书介绍了四种：微分方程分析法（又称时域分析法）、根轨迹分析法和频率特性分析法是经典控制理论的三种基本分析法；状态空间分析法是现代控制理论的基础。工业仪表及自动化专业学生应该熟悉和掌握这四种方法。状态空间分析法的数学基础是线性代数和矩阵论，这部分数学知识在工程数学中已讲授过，为了应用，有些内容在本书的第六章中作少量的复习。希望学生通过学习能够了解和掌握控制系统最基本的理论和方法。

过程控制原理的研究方法，是把实际系统抽象为数学模型，应用数学工具来进行分析设计和讨论。因此会使问题显得抽象难理解，这里面要注意数学的推证结论是具有物理意义的。所以，学习本课程既要掌握数学分析方法，又要理解其物理意义，加之控制原理逻辑性强，有利于学生掌握分析问题和解决问题的方法。本课程内容是自动控制理论中的最基础的内容，也是在控制工程技术中应用最普遍的内容。对这些基本内容的了解与掌握，有助于解决一般自动控制中的技术问题，也是为专业后续课程和在自动控制理论方面的进一步提高打下基础。

四、本课程与其他课程的关系

过程控制原理是过程控制技术的基本理论，是工业仪表及自动化专业学生的一门理论性较强的专业课程。

就专业所设置的课程之间的关系来看，过程控制原理是过程控制工程、过程控制仪表、计算机控制专业课程的基础理论课程；就内容之间的关系而言，过程控制原理是过程控制工程的前绪课，过程控制工程要应用过程控制原理中的基础理论去解决控制系统工程应用中的问题，这两门课程联系非常紧密。过程控制原理所需的基础是：高等数学、工程数学、电路基础、化学工程及计算机等方面的知识。

由于过程控制技术的广泛应用和计算机控制技术的迅速发展，过程控制系统逐渐将由常规过程控制系统向计算机过程控制系统发展，如当前发展和应用最广泛的集散控制系统。因此，过程控制原理不仅是自动控制和仪表专业的主要技术基础课程，对其他如电气、机械、冶金、化工工艺、制药、轻工等专业的学生来说，对自动控制原理有一定的了解，有助于从事本专业的自动化发展。

第一章 过程控制系统的基本概念

第一节 过程控制系统的组成及其分类

一、过程控制系统的组成

自动控制是在人工控制的基础上发展起来的。下面先通过一个示例，将人工控制与自动控制进行对比分析，看自动控制系统是由哪些部分组成的。

图 1-1 是电厂、化工厂里常见的生产蒸汽的锅炉设备。锅炉汽包水位过低会影响蒸汽产生量，并很容易将汽包中的水烧干而发生严重事故。汽包水位过高将使蒸汽带水滴并有溢出的危险。因此，维持锅炉汽包水位在设定的标准高度值是保证锅炉正常运行的重要条件。

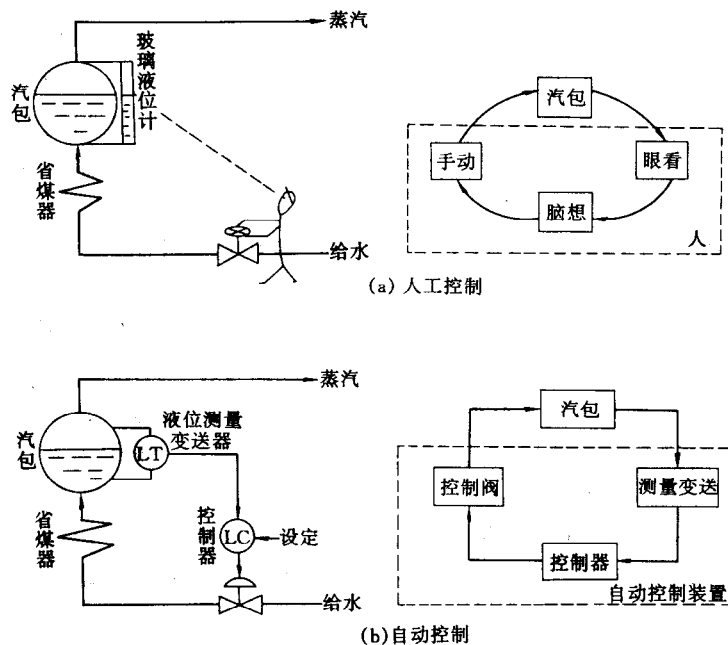


图 1-1 锅炉汽包水位控制示意图

图 1-1 (a) 所示为人工控制。用眼睛观察玻璃液位计中水位高低，并通过神经系统告诉大脑；大脑根据眼睛看到的水位高度，加以思考并与要求的水位标准值进行比较，得出偏差大小和方向，然后根据操作经验发出命令给执行机构；根据大脑发出的命令，用双手去改变给水阀门开度，使蒸汽的消耗量与给水量相等最终使水位保持在设定的标准值上。人的眼、脑、手三个器官，分别担负了检测、判断和运算、执行三个作用，来完成测量、求偏差、再控制以纠正偏差的过程，保持汽包水位的恒定。

图 1-1 (b) 所示为自动控制。液位变送器将汽包水位高低的物理量测量出来并转换为工业仪表间的标准统一信号（气动仪表为 $20\sim 100\text{kPa}$ ，电动Ⅱ型仪表为 $0\sim 10\text{mA DC}$ ，电动Ⅲ型仪表为 $4\sim 20\text{mA DC}$ ）。控制器接受测量变送器送来的标准统一信号，与锅炉工艺要求保持

的标准水位高度信号相比较得出偏差，按某种运算规律输出标准统一信号。控制阀接受控制器的控制信号改变阀门的开度控制给水量，控制汽包水位稳定。

通过上述示例的对比分析知道，一般过程控制系统是由被控对象和自动控制装置两大部分或由被控对象、测量变送器、控制器、控制阀四个基本环节所组成。

二、过程控制系统的方块图及其术语

为了能清楚地说明过程控制系统的结构及各环节之间的相互关系和信号联系，常用方块图来表示，如图 1-2 所示。

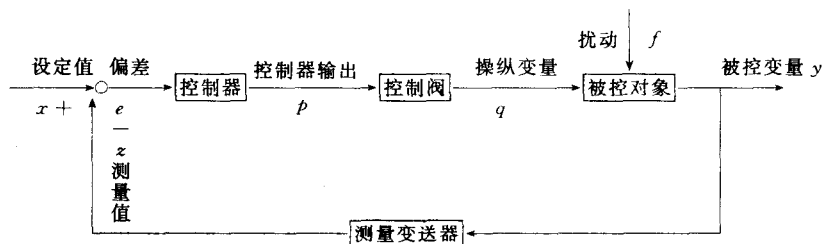


图 1-2 过程控制系统方块图

方块图中每个方块代表系统中一个环节，方块之间用一条带有箭头的直线表示它们相互间的联系，线上箭头表示信号传递的方向，线上字母说明传递信号的名称。另外，箭头还具有单向性，即方块的输入只能影响输出，而输出不能影响输入。还需强调的是方块图中各线段表示的是信号关系，而不是指具体的物料或能量。方块图是过程控制系统中一个常用工具和重要的概念。

现在结合锅炉汽包水位控制的例子及其方块图，说明过程控制系统中常用术语的意义。

1. 被控对象（简称对象或过程）

是被控制的工艺设备、机器或生产过程。在图 1-1 中，被控对象就是锅炉汽包。

2. 被控变量 y

是表征生产设备或过程运行是否正常而需要加以控制的物理量。在图 1-1 中汽包水位就是被控变量。过程控制系统的被控变量常有温度、压力、流量、液位、成分等。

3. 扰动 f

在生产过程中，凡是影响被控变量的各种外来因素都叫扰动（又称干扰）。在图 1-1 中，给水压力变化而引起水位波动是一种扰动；蒸汽负荷变化而引起水位波动也是一种扰动等等。

4. 操纵变量 q

受控制装置（控制器）操纵，并使被控变量保持在设定值的物理量或能量，被称为操纵变量。在图 1-1 中，往锅炉汽包中注入的给水量就是操纵变量。

5. 测量变送器

如果发现扰动对被控变量有影响，观察被控变量是否维持在预定的设定范围之内，这就要利用测量元件对被控变量进行测量，并转换成一定的标准统一信号输出。在图 1-1 中用的是液位变送器。

6. 测量值 z

就是测量变送器的输出信号。

7. 设定值 x

是一个与要求的（期望的）被控变量相对应的信号值。

8. 偏差值 e

在过程控制系统中,规定偏差值是设定值与测量值之差,即 $e=x-z$ 。但在仪表制造厂中,习惯取偏差 $e'=-e=z-x$,即把 $z>x$ 称为正偏差, $z<x$ 称为负偏差,两者相差个负号须注意。

9. 控制器输出 p (亦称控制信号)

在控制器内,设定值与测量值进行比较得出偏差值,按一定的控制规律(比例、比例积分、比例积分微分)发出相应的输出信号 p 去推动执行器(控制阀)。

10. 控制阀

控制阀执行控制器的控制信号,通过阀门开度变化将控制信号的变化转换成操纵变量的变化。图1-1中,控制阀根据控制信号对锅炉汽包的进水量进行控制。

11. 反馈控制系统

把输出信号通过测量变送器又引回到输入端,这种作法称为反馈。过程控制系统又称反馈控制系统。当系统输入端送回的信号与设定值相减,即取负值与设定值相加,这属于负反馈;当反馈信号取正值与设定值相加,这属于正反馈。过程控制系统一般采用的是负反馈。

12. 闭环系统与开环系统

凡是系统的输出信号对控制作用有直接影响的控制系统,就称作闭环控制系统。例如图1-1所示便是闭环控制系统。在图1-2的方块图中,任何一个信号沿着箭头方向传递,最后又回到原来的起点,从信号的传递角度来看,构成了一个闭合回路。所以,闭环控制系统必然是一个反馈控制系统。

若系统的输出信号对控制作用没有影响,则称作开环控制系统,即系统的输出信号不反馈到输入端,不形成信号传递的闭合



图 1-3 开环控制系统

环路,如图1-3所示。家用洗衣机便是开环控制系统的实际例子,从进水、洗涤、漂洗、到脱水整个洗衣过程,是在洗衣机中顺序完成的,而对衣物的清洁程度(系统的输出信号)没有进行测量。显然,开环控制系统不是反馈控制系统。

由于闭环控制系统采用了负反馈,因而使系统的输出信号受外来扰动和内部参数变化小,具有一定的抑制扰动提高控制精度的特点,开环控制系统则不能做到这一点。但开环控制系统结构简单容易构成,稳定性不是重要问题,而对闭环控制系统稳定性始终是一个重要问题。

三、过程控制系统的分类

过程控制系统有多种分类方法,每一种分类方法都是反映了控制系统某一方面的特点。为了便于分析反馈控制系统的特性,我们将按设定值的形式不同,分为三种类型。

1. 定值控制系统

所谓定值控制系统,是指过程控制系统的设定值恒定不变。工艺生产中要求控制系统的被控变量保持在一个标准值上不变,这个标准值就是设定值(亦称期望值)。

图1-1所示的锅炉汽包水位控制系统就是一个定值控制系统。过程控制系统大多数都属于定值控制系统。由于引起这类系统输出参数(被控变量)波动的原因不是设定值的改变,而是各种扰动,系统的任务就是要克服扰动对被控变量的影响,所以也把以扰动信号为输入的系统叫做定值控制系统。

2. 随动控制系统

随动控制系统也称跟踪控制系统。这类系统的设定值是无规律的变化,是未知的时间函数。控制系统的任务是使被控变量尽快地、准确地跟踪设定值变化,例如地对空导弹系统就

是典型的随动控制系统。

3. 程序控制系统

程序控制系统的设定值有规律的变化,是已知的时间函数。这类系统多用在间歇反应过程,如啤酒发酵罐温度控制就属于这类系统。

上述各种反馈控制系统中,各环节的传递信号都是时间的函数,因而统称为连续控制系统。若系统中有一个以上环节的传递信号是断续的,则这类系统为离散控制系统,计算机控制系统就属于这类系统。当系统各环节输入输出特性是线性时,则称这种系统为线性控制系统,反之为非线性系统。根据系统的输入和输出信号的数量可分为单输入单输出系统和多输入多输出系统等等。

在石油、化工、电力、冶金、轻工等工业生产过程中,定值控制系统占大多数,故研究的重点是线性、连续、单输入单输出的定值控制系统。

第二节 过程控制系统的过渡过程和质量指标

一、过程控制系统的过渡过程

在图 1-1 所示的锅炉汽包水位控制系统中,当给水量与蒸汽量相等时,汽包水位将保持不变,系统处于平衡状态。当给水量与蒸汽量不相等时,汽包水位将上下波动变化,系统处于不平衡状态。把被控变量不随时间而变化的平衡状态称为静态或稳态;而把被控变量随时间而变化的不平衡状态称为动态或瞬态。

当锅炉汽包水位控制系统处于平衡状态即静态时,扰动作用为零,设定值不变,系统中控制器的输出和控制阀的输出都暂不改变,这时被控变量汽包水位也就不变。一旦设定值有了改变或扰动作用于系统,系统平衡被破坏,被控变量开始偏离设定值,此时控制器、控制阀将相应动作,改变操纵变量给水量的大小,使被控变量汽包水位回到设定值,恢复平衡状态。从扰动的发生,经过控制,直到系统重新建立平衡,在这段时间中整个系统的各个环节和变量都处在变化状态之中,这种变化状态就是动态,动态比静态复杂。在生产过程中,不仅要了解系统的静态,更需要了解系统的动态。当过程控制系统在动态阶段中,被控变量是不断变化的,这一随时间变化的过程称为过程控制系统的过渡过程或时间响应。即一个过程控制系统在外作用下从原有稳定状态过渡到另一个稳定状态的过程,称为过程控制系统的过渡过程。过程控制系统的输出变量变化是由于有输入变量(设定或扰动),所以,输出是输入的时间响应。时间响应对应着过渡过程,稳态响应对应着过渡过程的静态,瞬态响应对应着过渡过程的动态。

二、典型输入信号

过程控制系统的响应与输入信号形式有关,输入信号不同,系统的响应也不同。过程控制系统的实际输入信号具有随机性质,事先不知道,无法用确定的数学式表达,即实际系统是不确定系统,这对规定要求,以及分析研究和设计带来相当困难。但是对大多数系统的工作条件来说,在所有可能的输入信号中,可以选取最典型的最不利的信号作为系统的输入信号(如阶跃信号),在此信号作用下,分析和试验系统的性能是否满足要求,从而可以估计系统在比较复杂的实际输入信号作用下的性能。这种处理,在很多场合是可行的,对设计自动控制系统,比较不同方案,也带来很大方便。对系统的性能要求,也就归结为系统在典型信号作用下应具有什么样的响应。

常有的典型信号有以下几种。

1. 阶跃函数信号

如图 1-4 所示。它的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A & t \geq 0 \end{cases}$$

式中 A = 常数。当 $A=1$ 时, 称为单位阶跃函数信号。阶跃函数信号是一种最常使用的系统分析信号, 在实际生产中也容易实现。

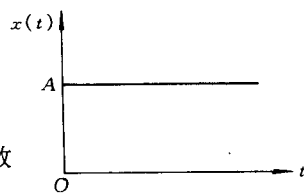
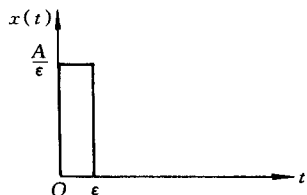


图 1-4 阶跃函数信号

2. 脉冲函数信号

如图 1-5 所示。它的数学表达式为

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A/\epsilon & 0 \leq t \leq \epsilon \\ 0 & t > \epsilon \end{cases}$$



脉冲函数信号的面积等于 A 。当 $A=1, \epsilon \rightarrow 0$ 时, 称为单位脉冲函数信号 (δ 函数)。

3. 正弦函数信号

正弦函数信号作为典型输入信号, 用于系统的频率特性分析, 将在第五章详细介绍。自动控制系统分析常用的还有斜坡函数信号、抛物线函数信号等, 在此不再详述。

三、对过程控制系统的基本要求

由于系统在控制过程中存在着过渡过程, 所以过程控制系统性能的好坏, 不仅取决于系统稳态时的控制精度, 还取决于瞬态时的工作状况。因此, 对过程控制系统的基本技术要求, 包含有稳态和瞬态两个方面, 一般可以归纳为以下三点。

1. 稳定性

系统要稳定, 控制过程要平稳。所谓稳定, 是指系统在受到外来作用时, 虽然会有一个过渡过程, 但经过一定的时间后, 过渡过程会结束, 最终恢复到稳定工作状态。

2. 准确性

系统稳态时要有较高的控制精度。当系统在设定作用时, 被控变量的稳定值与设定值保持较精确的一致。当系统受到扰动作用时, 被控变量的稳定值应基本不受影响, 与设定值保持一致。

3. 快速性

系统的输出对输入作用的响应要迅速, 系统的过渡过程时间尽可能短。因为在过渡过程期间系统尚未达到稳定, 被控变量还未能达到最佳控制值, 实际值与期望值之间有相当大的差异, 所以提高响应速度, 缩短过渡时间, 对提高控制效率和控制过程的精度都是有利的。

在阶跃扰动作用下, 过程控制系统的过渡过程将出现如图 1-6 所示的几种形式。

1. 发散振荡过程

图 1-6 (a) 所示的被控变量变化幅度越来越大, 表现为发散振荡的过渡过程。说明了一旦扰动进入系统, 经控制器的控制以后, 被控变量的振荡逐渐增大, 越来越偏离设定值, 最后超出限度出现事故。这属于一种不稳定的控制系统, 是不希望的。

2. 等幅振荡过程

图 1-6 (b) 所示的被控变量变化为一等幅振荡的过渡过程, 即不衰减也不发散处于稳定与不稳定的边界。这种控制系统一般被认为是一种不稳定状态而不采用。

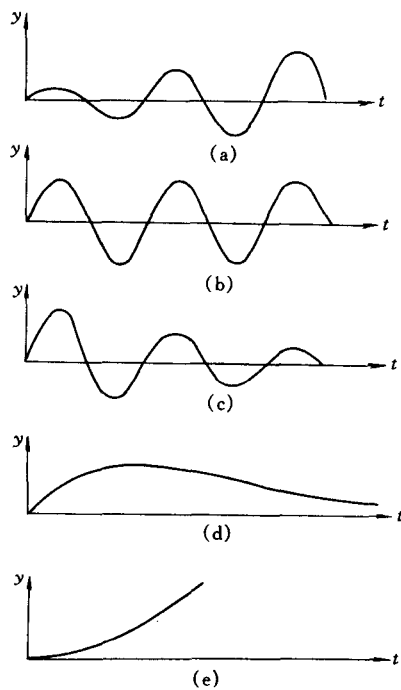


图 1-6 过渡过程的几种基本形式

3. 衰减振荡过程

图 1-6 (c) 所示的就是一个衰减振荡过渡过程。被控变量经过几个周期波动后就重新稳定下来, 符合对系统基本性能的要求: 稳定、迅速、准确, 是所希望的。

4. 非振荡衰减过程

图 1-6 (d) 所示是一个非振荡的单调衰减过渡过程。被控变量偏离设定值以后, 要经过相当长的时间慢慢的才接近设定值。非振荡衰减过程符合稳定要求, 但不够迅速, 不是理想的不宜采用, 只有当生产上不允许被控变量有较大幅度波动时才采用。

5. 非振荡发散过程

图 1-6 (e) 所示是一个非振荡发散的过渡过程。它与发散振荡过程同属于不稳定的系统, 是不希望的。

四、过程控制系统的质量指标

质量指标是衡量控制系统质量的一些数据。根据分析的方法不同, 质量指标也有很多形式。时域分析方法(微分方程分析法)中常用的是以过渡过程形式表示的质量指标, 下面就讨论过程控制系统在阶跃信号作用下的过渡过程质量指标。

1. 最大偏差 A (或超调量 B)

最大偏差等于被控变量的最大指示值与设定值之差。

对于在阶跃扰动作用下的控制系统, 过渡过程的最大偏差是被控变量第一个波的峰值与设定值之差, 如图 1-7 (a) 中的 A 表示。对于在阶跃设定作用下的控制系统, 过渡过程的最大偏差如图 1-7 (b) 中的 A 表示。

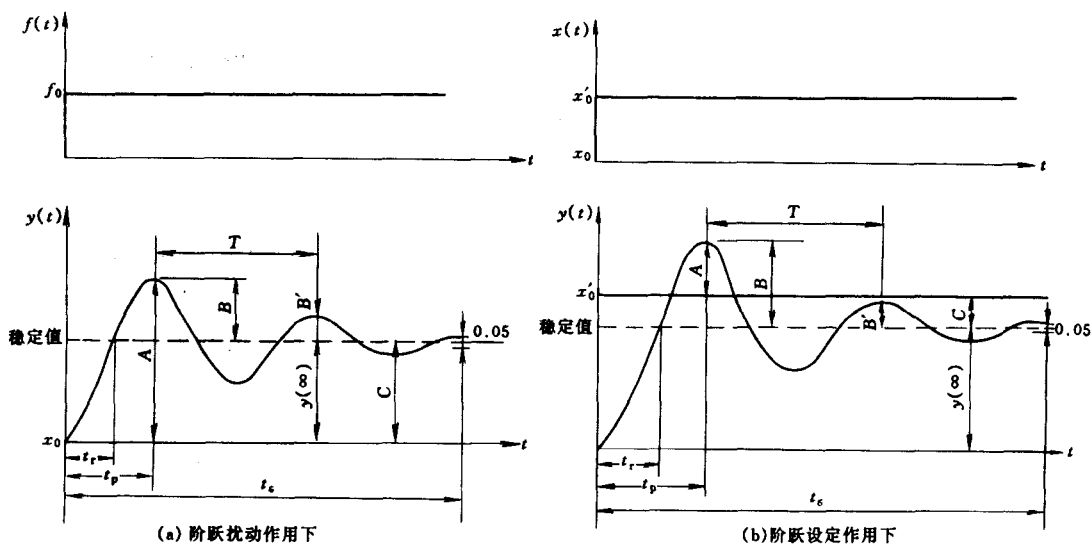


图 1-7 过渡过程质量指标示意图

最大偏差反映系统在控制过程中被控变量偏离设定值的程度，也可以用超调量 B 表示，如图 1-7 所示。超调量是指过渡过程曲线超出新稳定值的最大值，即

$$B = \text{最大指示值} - \text{新稳定值} = y(t_p) - y(\infty)$$

所以，图 1-7 (a) 中 $B = A - C$ ，图 1-7 (b) 中 $B = A + C$ 。

对于系统在阶跃设定作用下有时用最大百分比超调量（相对超调量） σ 表示，即

$$\text{相对超调量 } \sigma = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100\%$$

最大偏差或超调量是描述被控变量偏离设定值最大程度的物理量，也是影响过渡过程稳定性的一个动态指标。

2. 衰减比 n

是指过渡过程曲线同方向的前后相邻两个峰值之比，如图 1-7 中 $B/B' = n$ ，或习惯表示为 $n:1$ 。可见 n 越小，过渡过程的衰减程度越小，意味着控制系统的振荡程度越加剧烈，稳定性也就低，当 $n=1$ 时，过渡过程为等幅振荡；反之， n 越大，过渡过程越接近非振荡过程，相应的稳定性也越高。从对过程控制系统的基本性能要求综合考虑（稳定、迅速），衰减比 n 在 4~10 之间为宜。如以 $n=4$ 为例，当第一波峰值 $B=1$ 时，则第二波峰值 B' 为 $1/4B$ ，第三波峰值为 $1/16B$ ，可见衰减之快。这样，当被控变量受到扰动之后，可以断定它只需经过几次振荡很快就会稳定下来，不会出现造成事故的异常值。因此，衰减比 n 是表示衰减振荡过渡过程的衰减程度，是反映控制系统稳定程度的一项指标。

3. 上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 和过渡时间 t_s

(1) 上升时间 t_r 是过渡过程曲线从零上升至第一次到达新稳定值所需的时间。

(2) 峰值时间 t_p 是过渡过程曲线到达第一个峰值所需的时间。

(3) 过渡时间 t_s 又称控制时间（过渡过程时间）。它是从扰动发生起至被控变量建立起新的平衡状态止的一段时间。严格地讲，被控变量完全达到新的稳态值需要无限长的时间。实际上从仪表的灵敏度以及工程上规定：过渡过程曲线衰减到与最终稳态值之差不超过 $\pm 5\%$ 时所需要的时间，为过渡过程时间或控制时间 t_s 。

上升时间 t_r 、峰值时间 t_p 和过渡时间 t_s 都是衡量控制系统快速性的质量指标。

4. 振荡周期 T （或振荡频率 f ）

过渡过程曲线从第一个波峰到同方向第二个波峰之间的时间叫做振荡周期或称工作周期，其倒数称为振荡频率或工作频率。在衰减比相等的条件下，振荡周期与过渡时间成正比，振荡周期短，过渡时间就快。因此，振荡周期也是衡量控制系统快速性的一个质量指标。

5. 余差 C （残余偏差）

余差 C 是过渡过程终了时设定值与被控变量的稳态值之差，用数学式表示为

$$C = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = x - y(\infty)$$

余差是一个反映控制系统准确性的质量指标，也是一个精度指标。它由生产工艺给出，一般希望余差为零或不超过预定的范围。

需要指出余差 C 与终值 $y(\infty)$ 的区别。在图 1-7 (a) 中的定值控制系统，终值与余值是相等的；在图 1-7 (b) 中的随动控制系统，终值不等于余差，而等于新的设定值 x' 与终值 $y(\infty)$ 之差。

综上所述，过渡过程的质量指标主要有：最大偏差或超调量、衰减比、过渡时间、振荡周期、余差。一般希望最大偏差或超调量、余差小一些，过渡时间短一些，这样控制质量就

好一些,但也有矛盾,不能同时给予保证。如当最大偏差和余差都小时,则过渡时间就要长。因此,要根据工艺生产的要求,结合不同的控制系统,对控制质量指标分出主次,区别轻重,优先保证主要控制质量指标。

本章小结

1. 主要内容

(1) 自动控制就是在没有人直接参与的情况下,用控制装置操纵机器设备或过程自动地按照人所预定的规律进行。

工业生产过程中温度、压力、流量、液位、成分等变量作为被控变量的这类控制系统称作过程控制系统。

(2) 过程控制系统是由被控对象(被控制的生产过程或机器设备)和自动控制装置(测量变送器、控制器、控制阀)组成。方块图能够清楚地表明系统的结构和环节间的信号传递。

(3) 过程控制应用负反馈原理,故称反馈控制系统;通过反馈使信号传递构成闭合环路,所以又称闭环控制系统。

过程控制系统通过测量变送器,把被控变量的测量值反馈到输入端与设定值进行比较,根据二者的偏差,控制器的控制作用(控制器输出)通过控制阀调整操纵变量,以保证被控变量与设定值一致,尽量不受扰动的影响。过程控制系统多为定值控制系统。

(4) 开环控制系统是没有对控制变量进行测量和反馈,当被控变量因系统受到扰动作用而发生偏离时,系统没有调整作用,通常控制精度低。

(5) 过程控制系统为了完成一定任务,必须具备一定的性能,常用过渡过程(或时间响应)来衡量。对过程控制系统的基本性能要求(质量指标)可归纳为:稳定、迅速、准确三个方面。

2. 基本要求

(1) 弄清楚组成过程控制系统的结构,掌握描述控制系统的原理图和方块图及其专用术语。

(2) 掌握闭环控制系统实现自动控制的基本原理,尤其是负反馈在过程控制中的作用。学会用负反馈原理构成简单的闭环控制系统。

(3) 了解开环控制与闭环控制的差别及各自的特点。

(4) 弄清楚定值控制系统与随动控制系统的区别,连续系统与离散系统的区别。

(5) 理解控制系统过渡过程(或时间响应)的概念,掌握对控制系统的基本要求以及按过渡过程评价控制系统的各项质量指标。

例题和解答

【例题 1-1】 试述开环控制系统的主要优缺点。

解 开环控制系统的主要优点是:

- (1) 结构简单,操作方便;
- (2) 成本比相应的闭环系统低;
- (3) 不存在稳定性问题;
- (4) 当被控变量不易测量或在经济上不允许时,采用开环控制比较合适。

开环控制系统的主要缺点是: